

EFEITO COMBINADO DO TEOR DE UMIDADE E DA MASSA ESPECÍFICA NA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA DE *Pinus elliottii*

Fernando Cardoso Lucas Filho¹

¹Eng. Florestal, Dr., Depto. de Ciências Florestais, Manaus, AM, Brasil - fecarlu@ufam.edu.br

Recebido para publicação: 05/03/2010 – Aceito para publicação: 13/07/2012

Resumo

A utilização de madeiras para fins estruturais sofre o efeito tanto do teor de umidade quanto da massa específica. Num mesmo lote de madeira há peças com diferentes teores de umidade e massas específicas. Para o seu uso estrutural com segurança, é necessário estimar a resistência e a rigidez considerando essa variação e determinando essas propriedades para diferentes teores de umidade e massas específicas. O estudo buscou estabelecer uma equação que facilite a determinação da resistência e da rigidez da madeira de *Pinus elliottii* Engelm para diferentes teores de umidade e massas específicas. O controle da umidade foi feito pelo monitoramento das massas dos corpos de prova em relação aos respectivos módulos de ruptura e elasticidade. A massa específica aparente apresentou melhor correlação com as propriedades mecânicas do que o teor de umidade, indicando que essa característica influi mais significativamente na resistência e rigidez, facilitando a classificação da madeira. A secagem da madeira até a classe de umidade na faixa entre 10% e 20% aumentou a resistência em cerca de 45% e a rigidez em 39%. O modelo que melhor representou a relação entre resistência, teor de umidade e massa específica aparente foi $\log(\text{MOR}) = 2,25 + 1,31\gamma - 1,50U$, e a relação entre rigidez, teor de umidade e massa específica aparente foi melhor representada por $\log(\text{MOE}) = 3,94 + 1,86\gamma - 2,99U^2$.

Palavras-chave: *Pinus*; relação resistência/umidade; classes de resistência.

Abstract

Conjoint effect of moisture content and density on resistance and rigidity of Pinus elliottii wood. The use of wood to structures is affected by moisture content and density. On same wood grade have different moisture and densities. To use structural woods with security would determinate the strength and elasticity to conditions considering the variations of moisture contents and densities. The present study looked for to establish an equation that facilitates the classification of the resistance of the wood of *Pinus elliottii* Engelm for different moisture content and several specific masses. The control of the moisture was made by the accomplishment of the masses of the proof bodies and related to the respective resistance and rigidity metrics. The apparent specific mass presented better correlation with the mechanical properties than the moisture content, indicating that this characteristic is more important for classification of the resistance wood than the moisture of wood. The drying of wood up to moisture content range between 10% and 20% increase the resistance about 45% and rigidity to 39%. The model than fit better to represent resistance and moisture content and density relationship was $\log(\text{MOR}) = 2,25 + 1,31\gamma - 1,50U$. To relationship between rigidity and moisture content and density the better model was $\log(\text{MOE}) = 3,94 + 1,86\gamma - 2,99U^2$.

Keywords: *Pinus*; resistance/moisture relationship; resistance; rigidity.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus elliottii* e suas relações com as propriedades físicas podem auxiliar na determinação da melhor forma de utilização da madeira dessa espécie para fins estruturais. Vários fatores contribuem para uma maior resistência e rigidez da madeira, entre os quais a variação do teor de umidade e de massa específica. O presente estudo proporcionou condições para avaliar a resistência e a rigidez da madeira de *Pinus elliottii* em diferentes teores de

umidade, o que ocorre em condições de uso da madeira, uma vez, que num mesmo lote de madeira, e até numa mesma árvore, há significativos gradientes de umidade.

Segundo Kollmann e Cotê Junior (1968), o aumento da resistência da madeira com o decréscimo no teor de umidade pode ser considerado um resultado tanto do fortalecimento e rigidez dos elementos estruturais da madeira como da sua compactação, devido à contração que acompanha a perda de água. Vários autores, entre eles Stamm (1964), Koch (1972) e Muñiz (1993), constataram a mesma hipótese na faixa de umidade correspondente à água higroscópica, ou seja, até o ponto de saturação das fibras.

O uso de modelos matemáticos é o método mais utilizado para representar a relação entre teor de umidade e resistência da madeira. Entre as equações estudadas, a mais comum é uso do modelo exponencial negativo, utilizado por Lima (1983) e Tanaami (1986), entre outros. Os coeficientes de determinação dos modelos geralmente apresentavam valores entre 0,90 e 0,98.

Assim, de modo a contribuir com a melhor classificação da madeira para fins estruturais, a presente pesquisa tem como objetivo testar a hipótese de que o efeito combinado da variação do teor de umidade e da massa específica sobre o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade obtidos no ensaio de flexão estática influencia significativamente a resistência à flexão e a rigidez da madeira de *Pinus elliottii* e pode ser representado por um modelo matemático, para avaliar essas propriedades mecânicas de acordo com seu teor de umidade e massa específica.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e amostragem de material

Os trabalhos de coleta de material seguiram métodos de amostragem buscando cobrir a variabilidade das propriedades entre e dentro dos indivíduos das espécies em estudo, obtidas de plantios localizadas na fazenda experimental da empresa Forex Importadora e Exportadora de Madeiras S.A., localizada no município de Três Barras (SC). Para a realização do estudo, foram selecionadas 10 árvores de *Pinus elliottii* com 21 anos de idade, diâmetro à altura do peito (DAP) com aproximadamente 45 cm, com fustes retos e sem bifurcações.

A identificação botânica das espécies foi realizada por especialistas do laboratório de dendrologia da UFPR após a coleta e preparo de exsicatas. De cada tora, foram obtidos dois toretes de dois metros de comprimento. O número da árvore e a designação de cada torete foram marcados no topo de cada torete, para posterior identificação na análise dos dados.

Efetuada a coleta dos toretes, eles foram desdobrados, com auxílio de serra fita, obtendo-se pranchões com 7 cm de espessura, passando pela medula (Figura 1), com posterior aplicação de solução de pentaclorofenato de sódio, para prevenir o desenvolvimento de fungos.

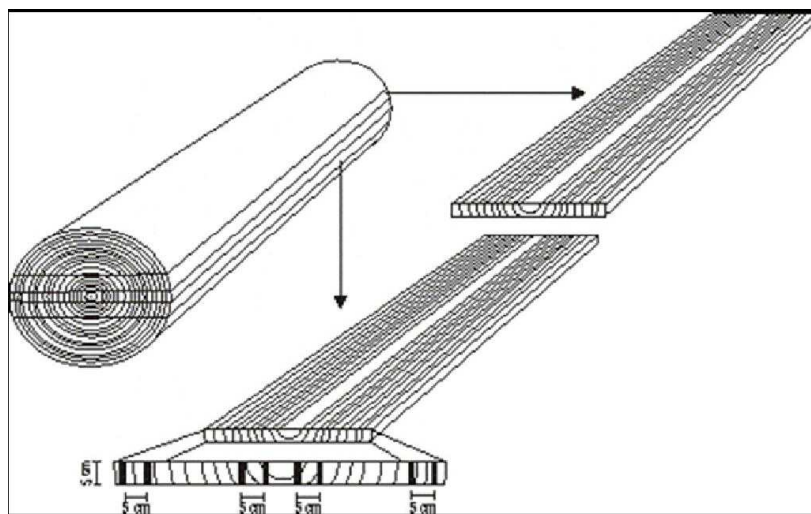


Figura 1. Ilustração da coleta de pranchões.

Figure 1. Wood beams collect Illustration.

Os pranchões foram, então, transportados para o Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal do Paraná, onde foram empilhados livres de contato com o solo e cobertos com lona plástica, para protegê-los da ventilação, identificados e serrados em vigotas com seção transversal de 5 cm x 5 cm, para confecção dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram obtidos em posições aleatórias das vigotas, para evitar a sistematização e a obtenção de amostras da mesma posição na tora. Depois de confeccionados, os corpos de prova foram condicionados em câmara climatizada a 20 °C e 65% de umidade relativa, até atingir a umidade de equilíbrio de 15%.

O método de amostragem seguiu os critérios estabelecidos na norma D143 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM-D143). Após a obtenção das amostras, foram confeccionados corpos de prova para ensaio de flexão estática, acondicionados para desidratação lenta e gradual. Ao longo deste processo, foi determinada a resistência para diversos teores de umidade e para as massas específicas correspondentes. O controle da umidade foi feito pelo monitoramento das massas dos corpos de prova.

Condicionamento do material

Antecedendo aos ensaios, os corpos de prova foram acondicionados em uma câmara climatizada (23 ± 2 °C de temperatura e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa). À medida que os corpos de prova perdiam umidade, até atingirem teor de umidade de equilíbrio de 12%, iam sendo ensaiados. O teor de umidade (TU) em que o material foi ensaiado foi determinado a partir da medição da massa de água nos corpos de prova, determinada pela equação 1.

Delineamento experimental

Para determinação do módulo de elasticidade, os corpos de prova da madeira próxima à medula e à casca foram submetidos a método de ensaio destrutivo (ensaio de flexão estática), segundo uma adaptação da norma ASTM D143 (*American Society for Testing and Materials*), uma vez que o teor de umidade foi uma variável de estudo e essa norma prevê teor de umidade de 15%.

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Massa específica aparente

A massa específica aparente foi determinada pelo método estequiométrico, a partir das medidas de massa e volume dos corpos de prova, e calculada pela razão entre massa e volume expressa em g/cm³. O volume foi calculado a partir da medição das dimensões dos corpos de prova, com o auxílio de um micrômetro da marca Palmer, com precisão de 0,01 mm, e um paquímetro da marca Mitutoyo, com precisão de 0,1 mm. A determinação da massa dos corpos de prova foi feita por pesagem, em balança com precisão de 0,01 g.

Obtenção dos teores de umidade

Para avaliação do teor de umidade, foi utilizada a equação 1. A massa foi obtida com a pesagem dos próprios corpos de provas testados nos ensaios mecânicos.

$$U = \frac{(P_u - P_o)}{P_o} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que: U% = teor de umidade expresso em percentual do peso da madeira seca;

P_o = massa do corpo de prova de madeira seco em estufa até massa constante (g);

P_u = massa do corpo de prova de madeira no teor de umidade (U) qualquer no momento do ensaio (g).

A pesagem dos corpos de prova ocorreu no momento imediatamente anterior ao ensaio mecânico e após os ensaios, depois de secagem em estufa a 103 ± 2 °C, até observação de massa constante.

O controle do teor umidade foi realizado através do monitoramento da massa dos corpos de prova, durante o processo de secagem, efetuado em dois estágios distintos. No primeiro, os corpos de prova saturados tiveram os topos selados com cola de poliestireno expandido, para evitar a formação de

gradientes de umidade na direção longitudinal. Posteriormente, foram acondicionados em ambiente climatizado, com temperatura e umidade do ar controladas, para evitar a formação de gradientes de umidade acentuados.

No segundo estágio, quando foi alcançada a umidade de equilíbrio, em cerca de 20%, os corpos de prova foram secos em estufa com temperatura de 35 ± 2 °C.

Com o objetivo de obter teores de umidade abaixo da umidade de equilíbrio e reduzir os gradientes de umidade, os corpos de prova foram retirados da estufa à medida que secavam, em intervalos frequentes, e acondicionados em dessecador. Posteriormente foram pesados, medidos e testados.

Determinação das propriedades mecânicas

Para determinação das propriedades mecânicas, foi utilizada uma máquina de ensaio universal, Tinus Olsen, com acessórios tais como suportes, deflectômetros e equipamento auxiliar para medição automática de deformação, carga e confecção de gráficos para os diferentes tipos de testes. Os dados foram armazenados em banco de dados do Microsoft Access.

Antes dos ensaios, foram registradas as dimensões e o peso de cada corpo de prova. Posteriormente foram calculados os respectivos teores de umidade e massa específica.

Determinação da resistência à flexão estática

O ensaio de flexão estática consistiu em submeter os corpos de prova com dimensões de 5 cm x 5 cm x 75 cm a uma carga central, até a ruptura. Os corpos de prova foram livremente apoiados, com a carga aplicada por meio de um cutelo central na face tangencial, no centro do vão de 70 cm. A velocidade de carregamento utilizada no ensaio foi de 1,3 mm/minuto. Durante o ensaio foram registradas a deformação e a carga correspondentes, para subsequente confecção dos gráficos.

A resistência à flexão foi determinada pela equação 2:

$$MOR = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$$

Em que: MOR = módulo de ruptura (kgf/cm²);

P = carga máxima, antes da ruptura (kgf);

L = comprimento do vão entre os apoios (cm);

h = altura da seção transversal do corpo de prova (cm);

b = largura da seção transversal do corpo de prova (cm).

A rigidez da madeira, expressa pelo módulo de elasticidade (MOE), foi determinada com a aplicação da equação 3:

$$MOE = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot d \cdot b \cdot h^3} \quad (3)$$

Em que: MOE = módulo de elasticidade (kgf/cm²);

P = carga máxima, antes da ruptura (kgf);

L = comprimento do vão entre os apoios (cm);

h = altura da seção transversal do corpo de prova (cm);

b = largura da seção transversal do corpo de prova (cm);

d = deformação correspondente à carga no limite de proporcionalidade (cm).

Análise estatística

O objetivo da análise estatística foi determinar estimativas dos parâmetros de resistência e rigidez da espécie de madeira em estudo, em função da variação do teor de umidade e da massa específica.

Os cálculos das estatísticas das propriedades estudadas foram desenvolvidos para cada uma das propriedades mecânicas aqui citadas. Foram determinadas a média, o coeficiente de variação (CV) e o intervalo de confiança (IC), com probabilidade dos resultados serem verdadeiros de 95%.

Foram realizadas análises de regressão múltipla, tendo como variáveis dependentes a resistência máxima, expressa pelo módulo de ruptura na flexão estática (MOR), e o módulo de elasticidade (MOE), e como variáveis independentes o teor de umidade (U) e a massa específica (γ).

Os modelos matemáticos utilizados para o ajuste das curvas, para relações entre as variáveis dependentes e as independentes, são mostrados nas equações 4 a 9:

$$y = b_0 + b_1\gamma + b_2U \quad (4)$$

$$y = b_0 + b_1\gamma + \frac{b_2}{U} \quad (5)$$

$$\ln y = b_0 + \ln \gamma + b_1U \quad (6)$$

$$y = b_0 + b_1\gamma + b_2U + b_3U^2 \quad (7)$$

$$\log y = b_0 + b_1\gamma + b_2U^2 \quad (8)$$

$$\ln y = b_0 + b_1U + b_2\gamma \quad (9)$$

Em que: y = propriedade mecânica;

γ = massa específica (g/cm^3);

U = teor de umidade, expresso em percentagem do peso da madeira seca.

Foram determinadas as correlações entre as propriedades mecânicas, o teor de umidade e a massa específica, para discriminação dos pesos das variáveis independentes no modelo matemático testado.

O objetivo do teste de vários modelos foi o de obter um modelo que apresentasse condições de explicar as propriedades estudadas, com pequena possibilidade de erro.

O erro padrão da estimativa foi utilizado como critério de seleção dos melhores modelos, por ele representar o desvio médio dos valores estimados pelo modelo matemático, em relação aos valores observados. Esse índice é a tradução numérica dos resíduos gerados pela regressão, portanto, quanto menor o erro padrão da estimativa, menos resíduos são gerados pelo modelo, proporcionando uma maior acuracidade na estimativa das propriedades mecânicas pelo modelo matemático obtido a partir da regressão.

Para a geração e análise dos modelos de regressão, foi utilizado o *software statistica 7.0*.

Os modelos matemáticos utilizados para estimativa da resistência em função de diferentes teores de umidade e massas específicas foram comparados utilizando-se como critério de seleção o menor erro padrão da estimativa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Médias das umidades

Para avaliar a magnitude do aumento da resistência e rigidez com a secagem da madeira, os valores médios de MOR e MOE foram separados em classes de teor de umidade. O MOR e o MOE aumentaram para madeira mais seca, abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Porém o MOE aumentou em menor proporção que o MOR, indicando que a variação do teor de umidade afeta mais significativamente a resistência do que a elasticidade da madeira, conforme mostra a tabela 1. Esse resultado é semelhante ao obtido por Tanaami (1986), que admite uma menor influência do teor de umidade sobre a elasticidade da madeira, quando comparada à resistência. Resultado semelhante foi encontrado por Bendtsen (1978) quando constatou que a madeira juvenil, de modo geral, caracteriza-se por menor densidade, maior ângulo das microfibrilas na camada S2, traqueídeos mais curtos, contração transversal menor, maior contração longitudinal, maior proporção de lenho de reação, menor porcentagem

de lenho tardio, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemicelulose, menor conteúdo de celulose e menor resistência, em relação à madeira mais adulta.

Para avaliar o acréscimo de resistência com a secagem, foi testado, também, o intervalo de 0% a 10% de teor de umidade (Tabela 2). Nesse intervalo, foi constatado que o aumento de resistência e rigidez foi pequeno, ou seja, a secagem a teores de umidade abaixo de 10% não é justificada para fins estruturais. Em testes efetuados em teores de umidade acima de 30%, também praticamente não foi observada variação em nenhuma das propriedades mecânicas aqui estudadas.

Tabela 1. Valores médios das propriedades mecânicas para duas classes de teor de umidade.

Table 1. Average values for mechanics properties for two moisture content classes.

Propriedade mecânica	Teor de umidade entre 10 e 20%	Teor de umidade entre 20 e 30%	Diferença (%)
MOR médio (kgf/cm ²)	594,54	409,23	45,28
Desvio padrão	196,01	118,98	
n	20	20	
MOE médio (kgf/cm ²)	87590,6	62784,4	39,51
Desvio padrão	36148,64	26112,03	
n	20	20	

Tabela 2. MOR e MOE para teores de umidade abaixo de 10% e acima de 30%.

Table 2. MOR e MOE for moisture content lower than 10% and above than 30%.

Propriedade mecânica	U<10%	Desvio padrão	n	U>30%	Desvio padrão	n
MOR (kgf/cm ²)	518,25	296,12	20	296	105,99	20
MOE (kgf/cm ²)	91714,61	32604,54	20	43219	28515,89	20

Variação das propriedades mecânicas com o teor de umidade e a massa específica

A variação das propriedades mecânicas com o os respectivos teores de umidade e massa específica está ilustrada nas tabelas 1 e 2. Os valores apresentados mostram que o MOR cresceu com o aumento da massa específica e com a redução do teor de umidade, seguindo resultados semelhantes aos obtidos por Lima (1983) e Tanaami (1986). O MOE apresentou o mesmo comportamento, porém menos evidente.

Correlações

A tabela 3 mostra a baixa correlação entre o teor de umidade e o módulo de elasticidade, também verificada nos estudos desenvolvidos por Kollmann e Cotê Junior (1968) e Tanaami (1986).

A massa específica apresentou melhor correlação com a elasticidade e a resistência do que com o teor de umidade, indicando que aquela propriedade física é mais importante que esta para estimativa da resistência à flexão da madeira. Isso sugere que, antes de classificar a madeira pelo seu teor de umidade, deve ser feita a classificação de acordo com a massa específica.

Tabela 3. Correlação (R) entre as propriedades mecânicas teor de umidade e massa específica.

Table 3. Mechanical properties, moisture content and specific gravity relations.

Propriedade mecânica	Teor de umidade	Massa específica
MOR	-0,59	0,79
MOE	-0,50	0,85

Estimativa das propriedades mecânicas

Estimativa do MOE

Para avaliar a variação das propriedades mecânicas, como teor de umidade (U) e massa específica da madeira (γ), foram testados os modelos propostos na metodologia. A seleção do melhor modelo foi feita a partir do menor erro padrão da estimativa.

O modelo $\log(MOE) = 3,94 + 1,86\gamma - 2,99U^2$ foi considerado o melhor estimador do módulo de elasticidade, em função da variação simultânea da massa específica (γ) e do teor de umidade (U), apresentando um erro padrão da estimativa igual a 11,60% e um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,74. Isso reflete a tendência de variação citada por Wilson (1932), segundo o qual, modelos logarítmicos são os mais indicados para avaliar as propriedades mecânicas em função dos teores de umidade.

A relação entre valores observados e valores estimados mostra que, em ensaios de flexão estática, apesar de as estimativas apresentarem muitos pontos fora do limite de confiança, os modelos podem ser úteis apenas para avaliar a tendência de variação do MOE com seus respectivos teores de umidade e massa específica.

De modo geral, os altos valores do erro padrão da estimativa do MOE nos ensaios de flexão estática traduziram a baixa correlação entre essa propriedade e o teor de umidade da madeira, sendo mais significativa a influência da massa específica.

Estimativa do MOR

Os resultados mostraram que a relação do módulo de ruptura com o teor de umidade da madeira aproxima-se de uma curva exponencial negativa, enquanto para a massa específica a relação apresentou tendência linear positiva. O MOR e o MOE aumentaram para madeira mais seca, abaixo do PSF, sendo que o MOE aumentou em menor proporção que o MOR, indicando que a secagem afeta mais a resistência do que a rigidez.

A secagem a teores de umidade abaixo de 10% mostrou que o acréscimo de resistência e rigidez foi pequeno, ou seja, para fins estruturais não é justificada a secagem a teores de umidade abaixo de 10%.

Já na faixa de umidade acima do PSF, verificou-se que praticamente não há alteração de nenhuma propriedade mecânica. Para estimar a resistência da madeira, a equação $\log(MOR) = 2,25 + 1,31\gamma - 1,50U$ apresentou o melhor ajuste aos dados observados, com erro padrão da estimativa de 8,58% e um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,772. A massa específica aparente apresentou melhor correlação com as propriedades mecânicas do que o teor de umidade, indicando que essa característica é mais importante para classificação da resistência da madeira do que o teor de umidade.

Aplicando essa equação para uma massa específica de $0,6 \text{ g/cm}^3$, foi possível observar que o MOR aumenta de cerca de 550 kgf/cm^2 para cerca de 900 kgf/cm^2 quando a madeira é seca de um teor de umidade de cerca de 40% para um teor de umidade de cerca de 15%.

A utilidade prática desse tipo de determinação é que, em se conhecendo as cargas impostas a uma estrutura, é possível determinar qual o teor de umidade que a madeira deve possuir para resistir ao esforço solicitante, ou, conhecendo-se o seu teor de umidade, determinar qual a resistência máxima que a madeira suportará. O modelo selecionado se apresenta com um menor erro padrão da estimativa, portanto melhor acuracidade, mesmo quando consideramos apenas o intervalo correspondente à água de impregnação, ou seja, até o PSF.

CONCLUSÕES

- A partir das equações obtidas pelo processo de regressão, pode-se confirmar a hipótese de que o modelo matemático pode estimar com precisão e confiabilidade tanto o acréscimo de resistência quanto o de rigidez para a madeira de *Pinus elliottii* com a secagem para quaisquer teores de umidades e massas específicas aparentes.
- A massa específica aparente apresentou melhor correlação com as propriedades mecânicas do que o teor de umidade, indicando que essa característica é mais importante para classificação da resistência da madeira do que o teor de umidade. Assim, foi possível determinar a magnitude do ganho de resistência com a redução do teor de umidade, passando de 550 para 900 kg/cm^2 , compreender melhor o comportamento da madeira como material estrutural e determinar as características físicas que podem ser utilizadas para fazer uma melhor classificação das propriedades mecânicas e, juntamente com o processo de secagem, obter um melhor ganho econômico.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 143**. Philadelphia, Pa. 1994.

BENDTSEN, B. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, v. 28, n. 10, p. 61 - 72, 1978.

KOCH, P. **Utilization of the southern pines**. USDA. Forest Service. Washington, v. 2, 1972. 734 p.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer, v. 2, 1968. 674 p.

LIMA, J. T. **Influência do teor de umidade nas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith. 1983**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1983.

MUÑIZ, G. I. B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. E *Pinus taeda* L. 1993**. 235 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.

TANAAMI, R. G. **Influência da umidade e da densidade em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira à flexão**. 1986. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

WILSON, J. **Moisture content in wood**. J. Winley, 1932, New York. 256 p.